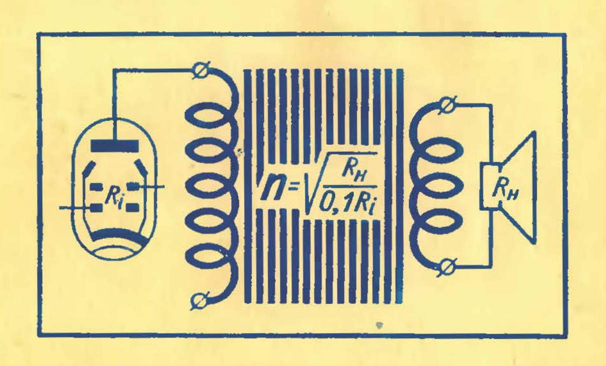
МАССОВАЯ РАДИО-БИБЛИОТЕКА



С. Н. КРИЗЕ

ВЫХОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ



Госэнергоиздат

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА *А. И. БЕРГА*

Выпуск 173

С. Н. КРИЗЕ

ВЫХОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

В настоящей брошюре, рассчитанной на радиолюбителей, излагаются в популярной форме основы теории и расчета выходных трансформаторов для усилителей звуковой частоты. Приведены также краткие сведения по конструктивному расчету маломощных выходных трансформаторов.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *А. Ф. Сенченков* Технич. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 17/XI 1952 г. Подписано к печати 28/I 1953 г.
Бумага $84 \times 108^{1}/_{32}$ — $^{1}/_{2}$ бумажн. — 1,64 печ. л. Уч.-изд. л. 2,1
Т-00239 Тираж 25 000 экз. Заказ 3402
Цена 85 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.)

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

Выходной трансформатор является простым, но достаточно важным элементом любого приемника или усилителя низкой частоты, от качества которого в сильной степени зависит работа всей установки. Неправильно рассчитанный выходной трансформатор может быть причиной появления значительных искажений, снижения мощности, отдаваемой во внешнюю нагрузку лампами выходного каскада, и т. д. Поэтому параметры выходного трансформатора должны выбираться в строгом соответствии с данными нагрузки и условиями работы выходного каскада: его схемой, типом ламп и режимом их работы.

НАЗНАЧЕНИЕ ВЫХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Лампа выходного каскада приемника или усилителя развивает в анодной цепи определенную мощность колебаний, соответствующих частоте полезного сигнала. Эта мощность P_1 зависит от амплитуд переменного тока I_1 и переменного напряжения U_1, действующих в цепи анода лампы, и определяется следующим простым выражением:

$$P_1 = \frac{U_1 I_1}{2}. \qquad (1)$$

В зависимости от постоянного напряжения источника анодного питания U_0 амплитуда переменного напряжения в цепи анода лампы в нормальном режиме обычно составляет:

для триодов

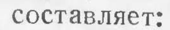
$$U_1 = (0{,}5 \div 0{,}7)\, U_0; \qquad (2)$$

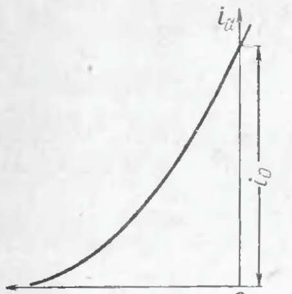
для пентодов и лучевых тетродов

$$U_1 = (0{,}7 \div 0{,}9)\, U_0. \qquad (3)$$

Таким образом, пентоды и лучевые лампы характеризуются лучшим использованием анодного напряжения, что обусловливает более высокий к. п. д. этих ламп.

Амплитуда переменной составляющей анодного тока I_1 зависит от значения тока i_0, соответствующего нулевому напряжению на управляющей сетке лампы (фиг. 1), и составляет:





Фиг. 1. Характеристика лампы выходного каскада.

i_0—анодный ток при нулевом смещении на управляющей сетке.

для триодов

$$I_1 = \frac{i_0}{5 \div 7}; \qquad (4)$$

для пентодов

$$I_1 = \frac{i_0}{2,5 \div 3}. \qquad (5)$$

Для маломощных усилительных ламп величина I_1 обычно не превышает 30—50 *ма*.

Полезная мощность, которую может развить лампа, оказывается равной:

для триода

$$P_1 = \frac{U_0 \cdot i_0}{20 \div 25}, \qquad (6)$$

для пентода или лучевого тетрода

$$P_1 = \frac{U_0 i_0}{5 \div 8}. \qquad (7)$$

В табл. 1 приведены основные данные, характеризующие режим работы анодной цепи некоторых типов ламп.

Таким образом, амплитуды напряжения и тока в цепи анода лампы оказываются заданными. Это налагает определенные требования на величину сопротивления нагрузки R_a в анодной цепи лампы, которое должно быть равно:

$$R_a = \frac{U_1}{I_1}. \qquad (8)$$

Например, для пентода 6Ф6, работающего в режиме класса А при анодном напряжении $U_0 = 250$ *в* сопротивление анодной нагрузки должно быть равно:

$$R_a = \frac{U_1}{I_1} = \frac{200}{27 \cdot 10^{-3}} = 7\,400 \text{ ом}.$$

Таблица 1

Типы ламп	Рабочий режим								
	Анодный ток покоя I_0, *ма*	Напряжение источника анодного питания U_0, *в*	Анодный ток i_0 при нулевом напряжении на управляющей сетке, *ма*	Амплитуда переменного напряжения U_1 в цепи анода, *в*	Амплитуда переменного тока I_1 в цепи анода, *ма*	Полная выходная мощность, *вт*	Сопротивление нагрузки R_a в цепи анода, *ом*	Внутреннее сопротивление R_i, *ом*	Напряжение на экранной сетке $U_э$, *в*
Выходные триоды									
2С4С	60	250	350	125	50	3,00	2 500	800	—
6С2С	10	250	35	160	8	0,32	2 000	7 000	—
6С4С	60	250	350	125	50	3,00	2 500	800	—
ГМ-57	75	600	450	400	60	6,00	6 500	1 500	—
Выходные пентоды и лучевые тетроды									
6Ф6	35	250	80	200	27	2,70	7 400	75 000	250
6П9	30	300	65	250	24	3,00	10 000	130 000	150
6П6С	45	250	120	180	36	3,20	5 000	50 000	250
6П3С	70	300	180	250	60	7,50	4 100	25 000	250

Такого же порядка (не менее нескольких тысяч *ом*) должны быть сопротивления нагрузок анодных цепей для усилительных ламп других типов.

Но сопротивление звуковой катушки динамического громкоговорителя обычно составляет единицы или, в крайнем случае, десятки *ом*. Столь значительное несоответствие величин сопротивлений фактической нагрузки усилителя и наивыгоднейшей нагрузки анодной цепи лампы выходного каскада заставляет применять выходной трансформатор в качестве согласующего элемента схемы.

Если низкоомное сопротивление нагрузки включить непосредственно в анодную цепь лампы, то это повлечет за собой весьма существенное уменьшение мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку. Кроме того, могут значительно возрасти нелинейные искажения, возникающие в выходном каскаде.

Сравним для примера режим работы пентода 6Ф6 при двух значениях сопротивления нагрузки анодной цепи $R_{a1} = 7\,400$ *ом* и $R_{a2} = 10$ *ом*. Второй случай соответствует

непосредственному включению низкоомной звуковой катушки динамика в цепь анода лампы.

При $R_a = 7\,400$ *ом* полезная мощность, отдаваемая лампой, окажется равной:

$$P_1 = \frac{1}{2} I_1 U_1 = \frac{1}{2} I_1^2 R_{a1} = \frac{1}{2}\left(\frac{27}{10^3}\right)^2 7\,400 = 2{,}7\ \textit{вт},$$

где $I_1 = 27$ *ма* — амплитуда тока в цепи анода при $R_{a1} = 7\,400$ *ом*.

При $R_{a2} = 10$ *ом* получим:

$$P_1 = \frac{1}{2} I_1^2 R_{a2} = \frac{1}{2}\left(\frac{30}{10^3}\right)^2 \cdot 10 = 0{,}045\ \textit{вт},$$

где $I_1 = 30$ *ма* — амплитуда анодного тока при коротком замыкании анодной цепи.

Следовательно, полезная мощность, отдаваемая лампой при низкоомной нагрузке, уменьшается в 60 раз. Одновременно возрастут нелинейные искажения приблизительно с 5 до 10%.

Кроме того, при непосредственном включении нагрузки в цепь анода через нее будет протекать постоянная составляющая анодного тока лампы, что во многих случаях (например, для звуковой катушки динамика) недопустимо.

Совершенно иная картина наблюдается, если низкоомную нагрузку $R_н$ включить через понижающий трансформатор. Сопротивление нагрузки $R'_н$ на средних частотах, отнесенное к первичной обмотке, окажется равным:

$$R'_н = \frac{R_н}{n^2}, \qquad (9)$$

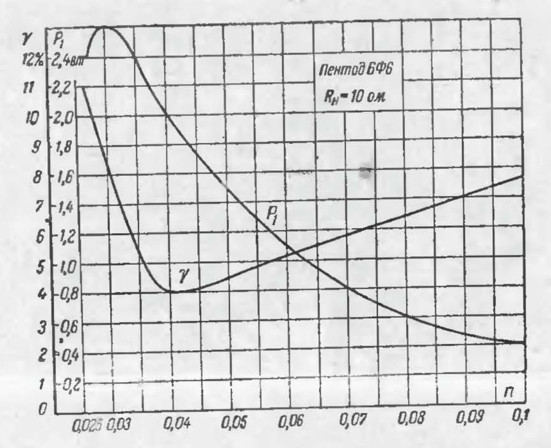
где n — коэффициент трансформации выходного трансформатора, равный отношению числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки.

Для понижающего трансформатора $n < 1$; это позволяет создать в цепи анода сопротивление, равное наивыгоднейшему для данной лампы даже при низкоомной нагрузке во вторичной обмотке.

Коэффициент трансформации, обеспечивающий заданное сопротивление анодной нагрузки R_a, может быть найден из следующей формулы, вытекающей из соотношения (9):

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{R_a}} \qquad (10)$$

Обычно $R_н < R_a$, поэтому наивыгоднейший коэффициент трансформации оказывается меньше единицы. Необходимость применения понижающего выходного трансформатора с физической стороны можно объяснить так. Для получения на сопротивлении нагрузки $R_н$ нужной полезной мощности необходимо, чтобы по этому сопротивлению проходил значительный ток, так как величина сопротивления $R_н$ невелика. В цепи анода лампы, как указывалось выше, протекает переменный ток сравнительно



Фиг. 2. Зависимость полезной мощности P_1 и коэффициента нелинейности γ от коэффициента трансформации n выходного трансформатора для пентода 6Ф6 при $R_н = 10$ *ом*.

небольшой величины. Применяя понижающий выходной трансформатор ($n < 1$), можно увеличить ток, протекающий в его вторичной обмотке по сравнению с током в первичной обмотке.

Работу выходного трансформатора можно до некоторой степени уподобить использованию механического рычага, который позволяет получить выигрыш в силе за счет проигрыша в расстоянии (пути). Понижающий выходной трансформатор подобно этому дает выигрыш в силе тока за счет проигрыша в напряжении.

На фиг. 2 показаны графики зависимости от коэффициента трансформации n двух основных показателей работы выходного каскада: полезной мощности P_1 и коэффициента нелинейности γ. Кривые построены для пентода

6Ф6, работающего в следующем режиме: напряжение источника анодного питания и напряжение на экранной сетке 250 *в*; отрицательное смещение на сетке 16,5 *в*; амплитуда сигнала на сетке 14 *в*; сопротивление нагрузки во вторичной обмотке трансформатора 10 *ом*. Рассмотрение этих кривых показывает, что для указанного режима наивыгоднейшее значение коэффициента трансформации выходного трансформатора лежит в пределах $n = 0{,}03$—$0{,}04$, причем меньшее значение ($n = 0{,}03$) дает максимум полезной мощности, а большее значение ($n = 0{,}04$) позволяет получить от лампы минимальные нелинейные искажения. Обычно целесообразно выбрать $n \approx 0{,}035$, что соответствует понижению напряжения выходным трансформатором приблизительно в 28 раз. В этом случае от лампы, в указанном выше режиме, можно получить полезную мощность около 2,4 *вт* при нелинейных искажениях порядка 5%.

ПАРАМЕТРЫ ВЫХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Свойства выходного трансформатора характеризуют следующие основные его параметры:

1) коэффициент трансформации $n = \frac{w_2}{w_1}$,

2) индуктивность первичной обмотки L_1,

3) индуктивность рассеяния L_p,

4) активные сопротивления обмоток (первичной r_1 и вторичной r_2).

Эти параметры, наряду с внутренним сопротивлением лампы R_i и сопротивлением нагрузки $R_н$, определяют собой частотную характеристику выходного каскада. Кроме этого, параметры трансформатора необходимо знать для его изготовления, так как они определяют собой конструктивные данные трансформатора: диаметр провода обмоток, количество витков и т. д.

Рассмотрим влияние параметров трансформатора на работу выходного каскада. Влияние коэффициента трансформации n на работу каскада было разобрано выше. Обратимся теперь к другим параметрам трансформатора.

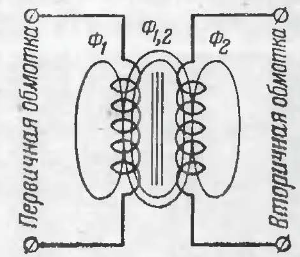
Индуктивность первичной обмотки, создаваемая магнитным потоком витков первичной обмотки, влияет на частотные искажения каскада в области низших частот,

Для того чтобы эти искажения не превышали заданной величины, трансформатор должен иметь индуктивность первичной обмотки L_1, не меньшую определенного значения.

Из двух трансформаторов, работающих в одинаковых условиях, лучшую частотную характеристику на низших частотах будет иметь трансформатор с бо́льшей индуктивностью первичной обмотки. Однако увеличение L_1 может быть получено исключительно за счет увеличения размеров, веса и стоимости трансформатора. Поэтому при проектировании трансформаторов стремятся ограничиться минимально необходимой индуктивностью первичной обмотки.

При работе трансформатора с сердечником из магнитного материала индуктивность первичной обмотки может изменяться в зависимости от величин постоянного и переменного тока в его обмотках. Чтобы избежать роста частотных искажений выше допустимой нормы, необходимо обеспечить заданное значение индуктивности первичной обмотки трансформатора в наиболее неблагоприятных условиях его работы. Влияние постоянного тока в обмотках трансформатора на индуктивность его первичной обмотки будет рассмотрено ниже.

Индуктивность рассеяния трансформатора обусловлена магнитными потоками, не охватывающими одновременно обе его обмотки. Эти магнитные потоки замыкаются через воздух и называются потоками рассеяния. Основной магнитный поток трансформатора $\Phi_{1,2}$, охватывающий обе его обмотки, а также потоки рассеяния Φ_1 и Φ_2 схематически показаны на фиг. 3. Потоки рассеяния и создаваемая ими индуктивность рассеяния служат причиной появления частотных искажений в выходном трансформаторе в области высших частот. При работе усилителя в режиме класса В индуктивность рассеяния может вызвать и нелинейные искажения. Поэтому индуктивность рассеяния L_p в выходных трансформаторах стремятся, по возможности, уменьшить. Это может быть достигнуто за счет улучшения магнитной связи между обмотками, например, путем применения обмоток, состоящих из чередующихся секций. Подобные меры применяются, однако,



Фиг. 3. Схема распределения магнитных потоков в трансформаторе.

не всегда, а лишь в случаях крайней необходимости, так как они усложняют конструкцию трансформатора и повышают его стоимость.

Индуктивность рассеяния не должна превышать некоторого значения, определяющегося заданной величины искажений. В хороших трансформаторах индуктивность рассеяния L_p не превышает долей процента от индуктивности его первичной обмотки.

Активные сопротивления обмоток трансформатора влияют на величину потерь в нем энергии звуковой частоты и определяют собой коэффициент полезного действия (к. п. д.) трансформатора. Величина к. п. д., строго говоря, зависит еще и от потерь в сердечнике. Но в трансформаторах звуковой частоты, особенно маломощных, величина потерь в сердечнике всегда мала по сравнению с потерями в обмотках. Это позволяет при подсчете к. п. д. учитывать лишь потери в обмотках трансформатора, пренебрегая потерями в сердечнике.

Для лучшего использования мощности, вырабатываемой лампами оконечного каскада усилителя, всегда выгодно иметь более высокий к. п. д. выходного трансформатора. Увеличение к. п. д. может быть достигнуто путем снижения потерь в обмотках, т. е. за счет увеличения диаметра провода при намотке трансформатора. Это неизбежно повлечет за собой увеличение его размеров и стоимости. При проектировании трансформатора следует выбрать такое компромиссное значение к. п. д., которое в какой-то степени удовлетворяет двум противоречивым требованиям: малым потерям и низкой стоимости трансформатора.

Опыт показывает, что величина к. п. д. выходного трансформатора может быть ориентировочно выбрана на основании табл. 2.

Таблица 2

Выходная мощность усилителя $P_{вых}$, *вт*	До 5	От 5 до 100	Больше 100
Коэффициент полезного действия выходного трансформатора η_T	0,7—0,8	0,8—0,9	0,9—0,95

Зная к. п. д. трансформатора, можно найти активное сопротивление его обмоток, а по нему диаметр провода, из которого они выполняются.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

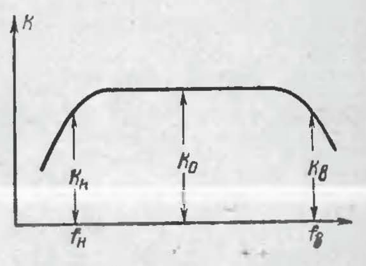
Для определения рассмотренных выше параметров выходного трансформатора необходимо знать следующие величины, определяющие условия работы оконечного каскада усилителя:

1. Рабочий диапазон частот, ограниченный низшей частотой $f_н$ и высшей частотой $f_в$.

2. Допустимые частотные искажения для выходного каскада на низшей частоте $f_н$ и высшей частоте $f_в$. Частотные искажения характеризуются коэффициентами частотных искажений $M_н$ и $M_в$, которые равны:

$$M_н = \frac{K_0}{K_н}; \quad M_в = \frac{K_0}{K_в},$$

где K_0 — усиление на средней частоте, $K_н$ и $K_в$ соответствуют обозначениям фиг. 4.



Фиг. 4. Частотная характеристика выходного каскада.

3. Данные внешней нагрузки усилителя, т. е. активное сопротивление $R_н$ и индуктивное сопротивление $L_н$.

4. Наивыгоднейшее сопротивление анодной нагрузки лампы выходного каскада R_a.

5. Коэффициент полезного действия выходного трансформатора η_T.

Параметры выходного трансформатора можно определить следующим образом.

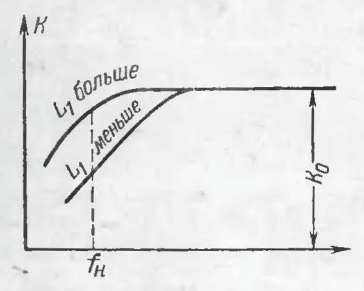
Коэффициент трансформации находим из приведенной выше формулы (8)

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{R_a}}.$$

Для двухтактной схемы следует подставлять удвоенное значение R_a.

От индуктивности первичной обмотки трансформатора L_1 зависит частотная характеристика выходного каскада в области низших частот. На фиг. 5 показаны частотные характеристики при двух значениях индуктивности первичной обмотки L_1. Характеристика, соответствующая

большему значению L_1, идет выше. Следовательно, с увеличением индуктивности первичной обмотки выходного трансформатора частотные искажения уменьшаются. С физической стороны это обстоятельство объясняется тем, что при бо́льшем значении L_1 индуктивность первичной обмотки в меньшей степени шунтирует нагрузку лампы. Для определения L_1 можно воспользоваться следующим выражением:



Фиг. 5. Влияние индуктивности первичной обмотки L_1 выходного трансформатора на частотную характеристику.

$$L_1 = \frac{R}{2\pi f_н \sqrt{M_н^2 - 1}}, \qquad (11)$$

где R — активное сопротивление каскада.

При работе в выходном каскаде триода $R = R_i$, а при работе пентода или лучевого тетрода

$$R = R_a \approx 0{,}1 R_i.$$

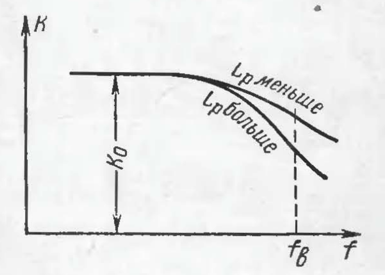
Если принять $f_н = 80$ *гц*, $M_н = 1{,}22$, то расчетная формула для определения индуктивности первичной обмотки выходного трансформатора принимает вид:

$$L_1 = \frac{R}{350}. \qquad (12)$$

Для двухтактной схемы выходного каскада индуктивность первичной обмотки следует брать вдвое большую, чем по формулам (11) и (12).

Если выходной каскад охвачен цепью отрицательной обратной связи, то величину L_1 можно взять приблизительно вдвое меньше.

Индуктивность рассеяния трансформатора L_p определяет частотную характеристику усилителя в области высших частот. Влияние L_p на частотную характеристику показано на фиг. 6. При увеличении индуктивности рассеяния коэф-



Фиг. 6. Влияние индуктивности рассеяния L_p выходного трансформатора на частотную характеристику.

фициент усиления на высших частотах уменьшается и частотные искажения растут. Максимально допустимая величина индуктивности рассеяния выходного трансформатора L_p при активном сопротивлении нагрузки во вторичной его обмотке может быть найдена из формулы

$$L_p = \frac{R_a + R_i}{2\pi f_в} \sqrt{M_в^2 - 1}, \qquad (13)$$

где $f_в$ — высшая частота полосы пропускания;

$M_в$ — коэффициент частотных искажений на этой частоте.

Если принять $f_в = 6\,000$ *гц* и $M_в = 1{,}2$, то формула для определения индуктивности рассеяния примет вид:

$$L_p = \frac{R_a + R_i}{60\,000}. \qquad (14)$$

Если нагрузка выходного каскада имеет значительную индуктивную составляющую, например когда нагрузкой служит звуковая катушка динамического громкоговорителя, то допустимое значение индуктивности рассеяния выходного трансформатора намного увеличивается по сравнению с величиной, полученной из формул (13) и (14).

При индуктивной нагрузке во вторичной обмотке индуктивность рассеяния выходного трансформатора можно определить из соотношения

$$L_p \leqslant L_н \frac{R_i}{R_н}, \qquad (15)$$

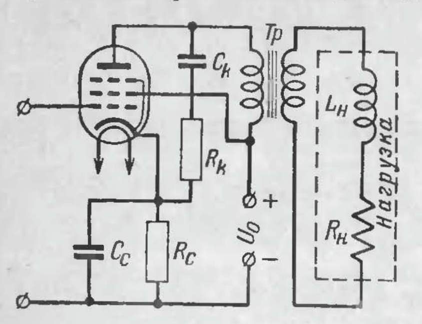
где $L_н$ — индуктивность нагрузки.

Для динамических громкоговорителей величина $L_н$ обычно бывает порядка $(0{,}2 \div 1) \cdot 10^{-3}$ *гн*.

Для двухтактной схемы величина индуктивности рассеяния выходного трансформатора может быть взята вдвое большей по сравнению со значениями, найденными из формул (13), (14) и (15).

Если в выходном каскаде усилителя работают пентоды или лучевые лампы, имеющие значительное внутреннее сопротивление (десятки тысяч *ом* и более), то допустимая индуктивность рассеяния оказывается столь значительной, что любой, практически выполненный трансформатор будет обладать меньшей индуктивностью рассеяния. Поэтому для каскадов, работающих на пентодах или лучевых лампах, индуктивность рассеяния выходного трансформатора

можно не определять и изготовлять трансформатор, не принимая мер для снижения его индуктивности рассеяния.



Фиг. 7. Схема включения корректирующей цепи $C_к R_к$ в каскаде, работающем на пентоде или лучевом тетроде.

Следует, однако, иметь в виду, что при работе в выходном каскаде лампы с большим внутренним сопротивлением без отрицательной обратной связи параллельно первичной обмотке трансформатора необходимо включить фильтр, состоящий из конденсатора $C_к$ и сопротивления $R_к$, как это показано на фиг. 7. Без такого фильтра каскад будет вносить недопустимо большие искажения.

Данные фильтра можно найти из следующих соотношений:

$$R_к = (1 \div 2) R_a, \qquad (16)$$

$$C_к = \frac{L_p + \frac{L_н}{n^2}}{R_к^2} \cdot 10^6. \qquad (17)$$

Активные сопротивления r_1 и r_2 обмоток трансформатора определяют по заданному к. п. д. из формул:

$$r_1 = \frac{R_a}{2}(1 - \eta_T); \qquad (18)$$

$$r_2 = r_1 n^2. \qquad (19)$$

Если принять $\eta_T = 0{,}85$, то

$$r_1 \approx \frac{R_a}{14}, \qquad (20)$$

$$r_2 \approx \frac{R_a}{14 n^2}. \qquad (21)$$

Формулы (18)—(21) дают максимально допустимое активное сопротивление обмоток трансформатора. Если фактическое сопротивление обмоток окажется меньше расчетного, то это благоприятно отразится на свойствах выходного трансформатора, так как его к. п. д. возрастет. Для двухтактной схемы в формулах (16)—(21) следует подставлять удвоенное значение R_a.

ПРИМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1. Расчет выходного трансформатора для однотактного каскада, работающего на пентоде.

Дано:

Низшая частота полосы пропускания $f_н = 70$ *гц*. Частотные искажения в пределах заданного диапазона частот не должны превышать 2 *дб*, т. е. $M_н \leqslant 1{,}26$. Сопротивление внешней нагрузки $R_н = 4$ *ом*. Индуктивность нагрузки $L_н = 4 \cdot 10^{-3}$ *гн*. Наивыгоднейшее сопротивление анодной нагрузки лампы $R_a = 7 \cdot 10^3$ *ом*. Коэффициент полезного действия выходного трансформатора $\eta_T = 0{,}85$.

Определяем коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{R_a}} = \sqrt{\frac{4}{7 \cdot 10^3}} = \frac{1}{24}.$$

Индуктивность первичной обмотки

$$L_1 = \frac{R}{2\pi f_н \sqrt{M_н^2 - 1}} = \frac{7 \cdot 10^3}{6{,}28 \cdot 70 \sqrt{1{,}26^2 - 1}} = 21 \text{ гн},$$

где $R = R_a$ (для пентода).

Находим данные корректирующего фильтра

$$R = 1{,}5\ R_a \approx 10 \text{ ком};$$

$$C_к = \frac{L_p + \frac{L_н}{n^2}}{R_к^2} \cdot 10^6 = \frac{0{,}01 \cdot 21 + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{1}{24}\right)^2}}{(10 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^6 = 0{,}025 \text{ мкф},$$

где принимаем $L_p \approx 0{,}01 L_1$, что обычно бывает в реальных трансформаторах.

Определяем активные сопротивления обмоток:

первичной обмотки

$$r_1 = \frac{R_a}{2}(1 - \eta_T) = \frac{7\,000}{2}(1 - 0{,}85) = 525 \text{ ом};$$

вторичной обмотки

$$r_2 = r_1 n^2 = 525 \left(\frac{1}{24}\right)^2 = 0{,}91 \text{ ом}.$$

2. Расчет выходного трансформатора для двухтактного каскада, работающего на триодах

Дано:

Рабочий диапазон частот $f_н = 60$ *гц*, $f_в = 8\,000$ *гц*. Частотные искажения в пределах заданного рабочего диапазона частот $M_н = M_в = 1{,}2$. Сопротивление внешней нагрузки $R_н = 10$ *ом*. Внутреннее со-

противление лампы $R_i = 1\,500$ *ом*. Наивыгоднейшее сопротивление анодной нагрузки каждой лампы $R_a = 4\,000$ *ом*. Коэффициент полезного действия выходного трансформатора $\eta_T = 0{,}9$.

Определяем коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{2R_a}} = \sqrt{\frac{10}{2\cdot 4\,000}} = \frac{1}{28}.$$

Индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора

$$L_1 = \frac{2R_i}{2\pi f_н \cdot \sqrt{M_н^2 - 1}} = \frac{2\cdot 1\,500}{2\cdot 3{,}14\cdot 60\sqrt{1{,}2^2 - 1}} = 12 \text{ гн.}$$

Индуктивность рассеяния

$$L_p = \frac{2(R_a + R_i)}{2\pi f_в}\cdot\sqrt{M_в^2 - 1} = \frac{1\,500 + 4\,000}{3{,}14\cdot 8\cdot 10^3}\sqrt{1{,}2^2 - 1} = 0{,}145 \text{ гн.}$$

Активное сопротивление обмоток:
первичной обмотки

$$r_1 = R_a(1 - \eta_T) = 4\,000\,(1 - 0{,}9) = 400 \text{ ом;}$$

вторичной обмотки

$$r_2 = r_1\cdot n^2 = 400\left(\frac{1}{28}\right)^2 = 0{,}5 \text{ ом.}$$

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Задачей конструктивного расчета является определение всех данных, необходимых для изготовления трансформатора, в том числе: размеров сердечника, количества витков обмоток, диаметра провода обмоток и т. д.

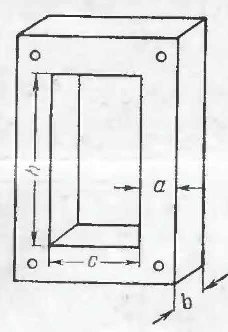
Исходными данными для конструктивного расчета служат электрические параметры трансформатора, найденные выше: индуктивность первичной обмотки, индуктивность рассеяния, коэффициент трансформации и сопротивления обмоток трансформатора.

Методика конструктивного расчета трансформатора зависит от режима работы его магнитной цепи. Наличие постоянного тока в первичной обмотке создает постоянный магнитный поток в сердечнике трансформатора, что существенно снижает магнитную проницаемость материала сердечника, а вместе с тем и индуктивность первичной обмотки L_1. Это заставляет пользоваться при расчете трансформаторов с постоянным подмагничиванием несколько иной методикой, чем для трансформаторов, работающих без постоянного магнитного потока в сердечнике (например, в двухтактных схемах).

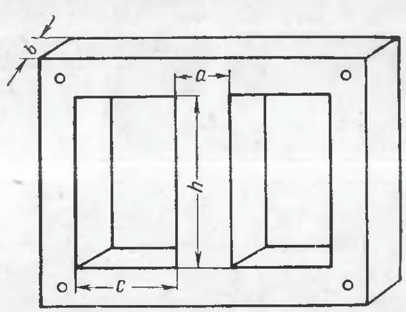
Как известно из предыдущего, индуктивность первичной обмотки трансформаторов низкой частоты, для удовлетворительного пропускания низших частот, должна быть достаточно велика (порядка нескольких генри и больше). Для получения такой индуктивности трансформаторы низкой частоты всегда выполняются со стальным сердечником.

Трансформатор состоит из следующих основных частей: 1) сердечника, 2) каркаса, 3) обмоток, 4) деталей, стягивающих сердечник и служащих для крепления трансформатора.

Сердечник трансформатора набирается из отдельных пластин толщиной от 0,2 до 0,5 *мм*. Пластины сердечника с одной стороны покрываются изолирующим лаком или иногда оклеиваются тонкой папиросной бумагой.



Фиг. 8. Стержневой (или О-образный) сердечник трансформатора.



Фиг. 9. Броневой (или Ш-образный) сердечник трансформатора.

Изоляция пластин сердечника друг от друга уменьшает потери в нем на вихревые токи, что способствует увеличению к. п. д. трансформатора.

Материалом для сердечника чаще всего служит листовая трансформаторная сталь, из которой штампуются пластины нужной формы.

В трансформаторах используются два типа сердечников: стержневой (или О-образный) и броневой (или Ш-образный). Стержневой сердечник показан на фиг. 8, а броневой на фиг. 9.

В маломощных трансформаторах низкой частоты наиболее распространенными являются броневые сердечники. Стержневые сердечники применяются главным образом в мощных выходных трансформаторах, работающих при высоких напряжениях.

Броневые трансформаторы наиболее просты в изготовлении, они имеют одну катушку, на которой расположены обмотки трансформатора. Однако изоляцию обмоток при этом осуществить труднее, чем в трансформаторе стержневого типа, в котором обмотки располагаются на двух катушках.

Для сборки броневых сердечников используют пластины Ш-образной формы, поэтому броневые сердечники иногда называются Ш-образными сердечниками. Для устранения зазора между основным листом и перемычкой сердечника его сборка ведется вперекрышку, для чего перемычка ставится поочередно то с одной, то с другой стороны. Стержневые сердечники собираются или из пластин Г-образной формы или же из прямоугольных пластин. Пластины сердечника после сборки стягиваются планками при помощи шпилек с гайками, вставляемых в отверстия, имеющиеся в пластинах. В трансформаторах малого размера сердечник иногда стягивается при помощи металлической скобки. Стяжные планки или скобки одновременно служат для крепления трансформатора. Каркас, на котором размещены обмотки трансформатора, выполняется обычно из прессшпана. Каркас состоит из гильзы и щечек.



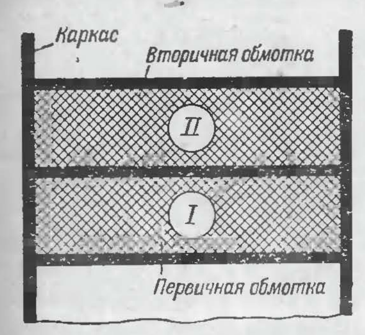
Фиг. 10. Схема бескаркасной намотки.

В целях удешевления производства трансформаторов часто практикуется так называемая бескаркасная намотка. При этом обмотки наматываются на гильзу, не имеющую щечек. Между слоями обмотки кладутся прокладки из тонкой бумаги, концы которых проклеиваются. Схема бескаркасной намотки показана на фиг. 10.

Намотку такого типа можно применять лишь в трансформаторах относительно малого размера, так как при большой высоте намотки (больше 20—25 *мм*) трудно обеспечить достаточную механическую прочность катушки, потому что появляется опасность сползания вниз верхних крайних витков обмоток.

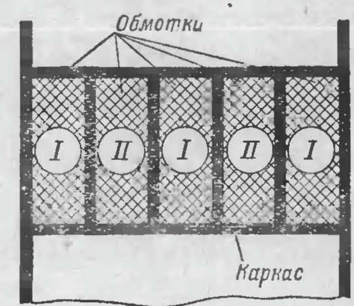
Обмотки трансформатора выполняются из медного провода с эмалевой, бумажной или шелковой изоляцией. В маломощных трансформаторах, как правило, применяется провод с эмалевой изоляцией (например ПЭЛ), как наиболее дешевый и занимающий наименьшее место на каркасе.

Провода с шелковой изоляцией (ПШД, ПШО), а также с эмалево-шелковой изоляцией (ПЭШД, ПЭШО) находят себе преимущественное применение в обмотках высокого напряжения (выше 1 000 *в*), где опасность междувиткового пробоя особенно велика и где предъявляются повышенные требования к электрической прочности изоляции провода. Для предохранения трансформатора от пробоя между слоями обмоток прокладываются изолирующие прокладки из тонкой бумаги или лакоткани. Для проводов с эмалевой изоляцией прокладки целесообразно делать после каждого слоя, для других проводов через 3—5 слоев намотки.



Фиг. 11. Цилиндрические обмотки трансформатора.

Для защиты трансформатора от влаги, а также для повышения его электрической прочности, катушки трансформатора заводского изготовления после намотки пропитываются специальным составом, например церезином или же изолирующим лаком. В некоторых случаях после пропитки катушка дополнительно покрывается поверхностным слоем битума, что значительно повышает влагостойкость трансформатора.



Фиг. 12. Дисковые (или галетные) обмотки трансформатора.

Порядок расположения обмоток на каркасе трансформатора принципиальной роли не играет. Здесь руководствуются в первую очередь соображениями удобства намотки. Обычно вниз помещают первичную обмотку трансформатора, но это правило не является обязательным.

Выводы обмоток выполняются из мягкого многожильного провода с хорошей изоляцией. Они соединяются с контактами на выводной колодке, служащей одновременно для присоединения внешних проводов к трансформатору.

Обмотки в трансформаторах применяют двух видов: цилиндрические (фиг. 11) и дисковые или галетные (фиг. 12).

Наиболее простыми в изготовлении и распространенными являются цилиндрические обмотки.

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ОДНОТАКТНЫХ СХЕМ

Расчет выходного трансформатора следует начинать с выбора типа и размеров сердечника. Иногда бывает задан наиболее желательный тип пластин сердечника и необходимо определить лишь толщину его набора.

Необходимые размеры выходного трансформатора зависят от его мощности. Для сердечника данного типа характерной величиной, определяющей максимальную мощность трансформатора, является произведение $Q_c \cdot Q_o$, где $Q_c = a \cdot b$ — площадь сечения стали и $Q_o = hc$ — площадь окна, в котором размещаются обмотки (фиг. 8 и 9).

Увеличение площади сечения стали Q_c позволяет уменьшить количество витков обмоток трансформатора при неизменной индуктивности его первичной обмотки L_1. Это, в свою очередь, дает возможность выполнить обмотки проводом большего диаметра, т. е. увеличить ток в обмотках трансформатора, а следовательно, и его мощность.

Если при неизменном сечении стали Q_c увеличить площадь окна Q_o, то это также позволяет на данном сердечнике выполнить трансформатор большей мощности, так как появляется возможность увеличить напряжение (за счет повышения числа витков) или ток (за счет увеличения диаметра провода) в обмотках трансформатора.

Если трансформатор работает с постоянным подмагничиванием, то его геометрические размеры можно найти по заданной мощности, воспользовавшись таким выражением:

$$Q_o \cdot Q_c = AP_1, \qquad (22)$$

где Q_o — площадь окна, $см^2$;

Q_c — площадь сечения стали, $см^2$;

P_1 — мощность трансформатора, *вт*;

A — коэффициент, зависящий от условий работы выходного каскада: типа применяемых ламп, заданных качественных показателей (полосы частот, частотных искажений). Кроме того, коэффициент A в сильной степени зависит от наличия в схеме выходного каскада отрицательной обратной связи.

Для различных условий работы выходного каскада коэффициент A ориентировочно может быть выбран по табл. 3.

Таблица 3

Тип лампы в выходном каскаде	Схема усилителя	A
Пентод или тетрод	Без отрицательной обратной связи	20
	С отрицательной обратной связью	10
Триод	Без отрицательной обратной связи	10
	С отрицательной обратной связью	5

Если, например, в выходном каскаде усилителя работает триод и отрицательная обратная связь в схеме не применена, то для мощности $P_1 = 3$ *вт* произведение Q_oQ_c должно быть не менее 30 $см^4$. При этом можно использовать сердечник, имеющий площадь сечения стали $Q_c = 3\ см^2$ при площади окна $Q_o = 10\ см^2$, или, с тем же успехом, можно взять сердечник, имеющий $Q_c = 6\ см^2$ и $Q_o = 5\ см^2$.

При выборе соотношения между сечением стали и сечением окна, при заданном произведении Q_oQ_c, следует иметь в виду, что увеличение Q_o требует бо́льшего расхода провода при намотке трансформатора, а увеличение Q_c требует большего количества трансформаторной стали. В большинстве случаев целесообразно выбирать величины Q_o и Q_c, приблизительно равные между собой.

В табл. 4 приведены основные справочные данные некоторых типов броневых сердечников.

После того как выбран тип сердечника для трансформатора, можно перейти к определению количества витков его обмоток.

Таблица 4

Тип сердечника	a, см	b, см	c, см	h, см	Q_c, см²	Q_o, см²	Q_cQ_o, см⁴	l_o, см	l_c, см	V_c, см³	Мощность P_1 (вт): для трансформатора с подмагничиванием	Мощность P_1 (вт): для трансформатора без подмагничивания
Ш-11	1,1	1,0	1,15	3,4	1,1	3,9	4,3	6,0	10	11	0,2	0,8
	1,1	2,0	1,15	3,4	2,2	3,9	8,6	9,0	10	22	0,4	1,6
Ш-15	1,5	1,5	1,35	2,4	2,25	3,24	7,3	10,0	11	25	0,35	1,0
	1,5	3,0	1,35	2,4	4,5	3,24	14,6	13,0	11	50	0,7	2,0
Ш-19	1,9	2,0	1,7	4,6	3,8	7,8	29,6	13,0	15	57	1,5	7,5
	1,9	4,0	1,7	4,6	7,6	7,8	59,2	17,0	15	144	3,0	15,0
Ш-20 (укороченный размер)	2,0	2,0	1,0	3,0	4,0	3,0	12,0	13,0	12	48	0,6	1,5
	2,0	4,0	1,0	3,0	8,0	3,0	24,0	17,0	12	96	1,2	3,0
Ш-25	2,5	2,5	2,5	6,0	6,2	15,0	94,0	17,0	20	125	5,0	35,0
	2,5	5,0	2,5	6,0	12,5	15,0	188	22,0	20	250	10,0	70,0
Ш-30	3,0	3,0	1,5	4,5	9,0	6,7	61	18,0	18	162	3,0	10,0
	3,0	6,0	1,5	4,5	18,0	6,7	122	24,0	18	324	6,0	20,0

Примечание. Мощности трансформаторов указаны ориентировочно для усилителей, работающих на пентодах без отрицательной обратной связи.

Количество витков первичной обмотки, которое обеспечит заданную индуктивность L_1, находится из формулы

$$w_1 = 10\,\frac{L_1 I_0}{Q_c}\left[1+\sqrt{1+\frac{3\,000\,Q_c l_c}{L_1 I_0^2}}\right], \qquad (23)$$

где I_0 — постоянная составляющая анодного тока выходной лампы, *ма*;

Q_c — площадь сечения сердечника, *см²*;

l_c — длина средней силовой линии в сердечнике, *см*.

Формула (23) дает точный результат, но вычисления по ней несколько сложны. В ряде практических случаев, когда не требуется высокой степени точности расчета,

491—2

для определения количества витков можно пользоваться следующей, значительно более простой приближенной формулой

$$w_1 \approx \frac{45 L_1 I_0}{Q_c}, \qquad (24)$$

где L_1, I_0 и Q_c — то же, что и в формуле (23).

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = n w_1. \qquad (25)$$

Диаметр провода (*мм*) первичной обмотки

$$d_1 = 15\cdot10^{-3}\sqrt{\frac{l_0 w_1}{r_1}}, \qquad (26)$$

где l_0 — средняя длина витка, *см*;

r_1 — активное сопротивление первичной обмотки, которое, как указывалось выше, определяется через к. п. д. трансформатора по формулам (18) или (20).

Во избежание перегрева первичной обмотки трансформатора необходимо сделать проверку допустимости найденного из выражения (26) диаметра провода по плотности тока:

$$d_1 \geqslant 25\sqrt{I_0}\cdot10^{-3}, \qquad (27)$$

где d_1 в *мм*; I_0 в *ма*.

Диаметр провода (*мм*) вторичной обмотки

$$d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{n}}.$$

Наконец, определяем длину зазора в сердечнике

$$l_з = \frac{w_1 I_0}{8}\cdot10^{-5}, \qquad (28)$$

где $l_з$ в *мм*; I_0 в *а*.

Этим заканчивается расчет выходного трансформатора, работающего с постоянным подмагничиванием. Далее следует сделать проверку размещения обмоток в окне сердечника.

Для лучшего уяснения последовательности расчета рассмотрим числовой пример.

Пример. Рассчитать выходной трансформатор к однотактному усилителю, на выходе которого работает пентод 6Ф6 при мощности

$P_1 = 2{,}5$ *вт*. Отрицательная обратная связь в схеме отсутствует. Сопротивление звуковой катушки динамика $R_н = 10$ *ом*.

1. Для выбора типа сердечника найдем произведение площади сечения стали на площадь окна по формуле (22), приняв $A = 20$:

$$Q_c \cdot Q_o = 20 P_1 = 50 \text{ см}^4.$$

2. По табл. 4 выбираем тип сердечника. Наиболее подходящим является сердечник Ш-19 × 40, для которого $Q_c Q_o = 59{,}2$ *см*^{4}, что несколько превышает требуемое значение (50 *см*^{4}). Остановившись на стали типа Ш-19, найдем минимальную толщину набора сердечника (размер b). Сечение стали

$$Q_c = \frac{50}{Q_o} = \frac{50}{7{,}8} = 6{,}4 \text{ см}^2,$$

а толщина набора

$$b = \frac{Q_c}{a} = \frac{6{,}4}{1{,}9} = 3{,}35 \text{ см} \approx 3{,}4 \text{ см}.$$

Итак, берем сердечник Ш-19 × 34, для которого

$$Q_c = 6{,}5 \text{ см}^2, \quad l_c = 15 \text{ см}, \quad l_o = 15 \text{ см}.$$

3. Из табл. 1 для пентода типа 6Ф6 находим:

Наивыгоднейшее сопротивление нагрузки $R_a = 7\,400$ *ом*. Постоянная составляющая анодного тока (ток покоя) $I_0 = 35$ *ма*.

4. Находим по формуле (12) индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора:

$$L_1 = \frac{R_a}{350} = \frac{7\,400}{350} = 21 \text{ гн} \approx 20 \text{ гн}.$$

5. Определяем по формуле (23) число витков первичной обмотки:

$$w_1 = 10\,\frac{20 \cdot 35}{6{,}5}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{3\,000 \cdot 6{,}5 \cdot 15}{20 \cdot 35^2}}\right] = 4\,950.$$

Интересно сопоставить полученный результат с расчетом по приближенной формуле (24):

$$w_1 = \frac{45 \cdot L_1 I_0}{Q_c} = \frac{45 \cdot 20 \cdot 35}{6{,}5} = 4\,850.$$

Разница, как видно, в данном случае получилась незначительная. Принимаем округленно $w_1 = 5\,000$ витков.

6. Коэффициент трансформации находим из формулы (8)

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{R_a}} = \sqrt{\frac{10}{7\,400}} = \frac{1}{27}.$$

7. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = n w_1 = \frac{1}{27} \cdot 5\,000 = 185 \text{ витков}.$$

8. Сопротивление первичной обмотки

$$r_1 = \frac{R_a}{2}(1 - \eta_T) = \frac{7\,400}{2}(1 - 0{,}8) = 740 \text{ ом},$$

где принимаем $\eta_T = 0{,}8$.

9. Диаметр провода первичной обмотки

$$d_1 = 0{,}015\sqrt{\frac{I_0 w_1}{r_1}} = 0{,}015\sqrt{\frac{15 \cdot 5\,000}{740}} = 0{,}15 \text{ мм}.$$

10. Проверяем d_1 по плотности тока:

$$d_1 \geqslant 25 \cdot 10^{-3}\sqrt{I_0} = 25 \cdot 10^{-3}\sqrt{35} = 0{,}148 \text{ мм}.$$

Мы приняли $d_1 = 0{,}15$, следовательно, трансформатор не будет перегреваться.

11. Диаметр провода вторичной обмотки

$$d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}15}{\sqrt{\frac{1}{27}}} = 0{,}8 \text{ мм}.$$

Изоляцию провода как для первичной, так и для вторичной обмотки берем эмалевую.

12. Определяем длину зазора в сердечнике:

$$l_з = \frac{w_1 I_0}{800\,000} = \frac{5\,000 \cdot 35}{800\,000} = 0{,}22 \text{ мм}.$$

В сердечнике броневого типа зазор состоит из двух промежутков, разрывающих магнитную цепь трансформатора, поэтому толщина прокладки должна быть вдвое меньше требуемой длины зазора:

$$l_{пр} = \frac{l_з}{2} = 0{,}11 \text{ мм}.$$

13. Делаем проверку размещения обмоток.

Число витков в слое первичной обмотки $\frac{42}{d_{1из}} = \frac{42}{0{,}17} = 240$, где $d_{1из} = 0{,}17$ — диаметр провода обмотки с учетом изоляции.

Число слоев первичной обмотки $\frac{5\,000}{240} = 21$.

Высота обмотки $21 \times 0{,}17 = 3{,}6$ *мм*. Добавим к этому 2 *мм* на прокладки между слоями (прокладки делают из папиросной бумаги). Тогда полная высота намотки составит 5,6 *мм*.

Число витков в слое вторичной обмотки $\frac{42}{0{,}9} = 46$.

Число слоев вторичной обмотки $\frac{185}{46} = 4$.

Высота (без прокладок) вторичной обмотки $4 \cdot 0{,}9 = 3{,}6 \approx 4$ *мм*. Высота с учетом прокладок между слоями ~ 5 *мм*.

Полная высота намотки с учетом прокладки между обмотками $6+1+5=12$ *мм*.

Высота каркаса составляет 15 *мм*. Следовательно, обмотки в окне сердечника должны поместиться.

Рассчитанный выше трансформатор к пентоду 6Ф6 может обеспечить приблизительно следующие качественные показатели:

частотные искажения в полосе от 100 *гц* порядка 1,5 *дб*;

частотные искажения в полосе от 50 *гц* порядка 4,0 *дб*;

к. п. д. (на средних звуковых частотах) составляет 80%.

Если взять меньшие размеры сердечника, то частотные искажения увеличатся, а к. п. д. трансформатора получится более низким.

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ДВУХТАКТНЫХ СХЕМ

Выходные трансформаторы в двухтактных схемах работают без постоянного подмагничивания в сердечнике. В аналогичных условиях работают также линейные трансформаторы (фидерные и абонентские), применяемые на трансляционных сетях проволочных радиоузлов.

Размеры трансформатора в этих случаях определяются следующими факторами:

а) допустимыми нелинейными искажениями, которые зависят от максимальной индукции в сердечнике;

б) полосой частот и допустимыми частотными искажениями на низших частотах;

в) заданным к. п. д.

Максимальная индукция в сердечнике зависит от соотношения между мощностью трансформатора и объемом его магнитной цепи. Однако в трансформаторах малой мощности (до 10 *вт*) индукция в сердечнике обычно получается весьма малой при любых практически приемлемых размерах трансформатора. Поэтому в маломощных выходных трансформаторах геометрические размеры сердечника практически мало зависят от максимально допустимой индукции.

Максимальная мощность трансформатора, работающего без подмагничивания, связана с размерами сердечника следующим приближенным соотношением:

$$P_1=\frac{Q_o^2 Q_c}{2l_c}, \qquad (29)$$

где P_1 — мощность трансформатора, *вт*;

Q_o — сечение окна, *см*²;

Q_c — сечение стали, *см*²;

l_c — длина средней силовой линии, *см*.

Формула (29) позволяет легко подобрать размеры сердечника по заданной полезной мощности трансформатора P_1. Если задан тип сердечника, то необходимую площадь стали Q_c можно найти из выражения

$$Q_c=\frac{2P_1 l_c}{Q_o^2}. \qquad (30)$$

В табл. 4 указаны ориентировочные значения мощностей трансформаторов, работающих без подмагничивания, которые могут быть получены с сердечниками различных типов.

Проверку максимальной индукции B в сердечнике трансформатора можно сделать по формуле

$$B=10^4\sqrt{\frac{2P_1}{V_c}}, \qquad (31)$$

где V_c — объем сердечника $=Q_c l_c$, *см*³.

Во избежание появления значительных нелинейных искажений в трансформаторе величина B не должна превышать 6 000—8 000 *гс*. Как указывалось выше, для маломощных трансформаторов индукция получается почти всегда меньше максимально допустимой и проверку по формуле (31) обычно можно не делать.

Максимальную индукцию в сердечнике можно связать с соотношением размеров данного сердечника. Оказывается, что индукция B не будет превышать допустимой величины, если выполняется условие

$$Q_o\leqslant\frac{l_c}{1{,}4}. \qquad (32)$$

Это условие, как видно из табл. 4, для большинства типов сердечников выполняется.

Для усилителей, выходные каскады которых охвачены цепью отрицательной обратной связи, мощность выходного трансформатора может быть установлена вдвое большей величины, чем это следует из формулы (29) или сечение сердечника соответственно может быть взято примерно вдвое меньше значения, найденного из формулы (30).

Число витков первичной обмотки трансформатора находим так:

$$w_1=450\sqrt{\frac{L_1 l_c}{Q_c}}, \qquad (33)$$

где L_1 — индуктивность первичной обмотки, определяемая в соответствии с выражениями (11) и (12). Следует иметь

в виду, что для двухтактных схем в качестве R_a в выражения (11) и (12) следует подставлять удвоенное значение сопротивления анодной нагрузки одного плеча. В остальном расчет выходного трансформатора для двухтактного каскада не отличается от рассмотренного выше расчета для однотактного каскада. Зазор в сердечнике трансформаторов, работающих без постоянного подмагничивания, не делается.

Рассмотрим пример конструктивного расчета трансформатора, работающего без постоянного подмагничивания.

Пример. Рассчитаем выходной трансформатор для двухтактного каскада, в котором работают лампы 6П3С, по одной в каждом плече.

1. Из табл. 4 видно, что для усилителя с обратной отрицательной связью при выходной мощности 20 *вт* наиболее подходящим типом сердечника является сердечник Ш-19. Найдем площадь сечения стали, воспользовавшись следующей формулой, справедливой для усилителя с отрицательной обратной связью:

$$Q_c = \frac{P_1 l_c}{Q_o^2} = \frac{20\cdot 15}{7{,}8^2} = 5 \text{ см}^2.$$

Следовательно, толщина набора сердечника составит:

$$b = \frac{Q_c}{a} = \frac{5}{1{,}9} = 2{,}6 \text{ см}$$

2. Найдем максимальную индукцию в сердечнике:

$$B = 10^4 \sqrt{2\frac{P_1}{V_c}} = 10^4 \sqrt{2\frac{20}{5\cdot 15}} = 7\,300 \text{ гс},$$

где V_c — объем сердечника равный $V_c = Q_c l_c = 5\cdot 15 = 75$ *см*³.

Полученное значение максимальной индукции является допустимым.

3. Определяем значение индуктивности первичной обмотки трансформатора.

$$L_1 = \frac{2R_a}{350} = \frac{2\cdot 4\,000}{350} = 23 \text{ гн},$$

где R_a — сопротивление нагрузки для одного плеча, которое для лампы 6П3С берем равным 4 000 *ом*. Наличие обратной связи позволяет снизить L_1 вдвое. Поэтому принимаем $L_1 = 11$ *гн*.

4. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = 450 \sqrt{\frac{L_1 l_c}{Q_c}} = 450 \sqrt{\frac{11\cdot 15}{5}} = 2\,580.$$

5. Коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{2R_a}} = \sqrt{\frac{5}{2\cdot 4\,000}} = \frac{1}{40}.$$

6. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = n w_1 = \frac{1}{40}\cdot 2\,580 = 65.$$

7. Сопротивление провода первичной обмотки

$$r_1 = R_a(1 - \eta_T) = 4\,000\cdot(1 - 0{,}85) = 600 \text{ ом}.$$

8. Диаметр провода первичной обмотки

$$d_1 = 0{,}015 \sqrt{\frac{w_1 l_o}{r_1}} = 0{,}015 \sqrt{\frac{2\,580\cdot 14}{600}} = 0{,}116 \text{ мм}.$$

9. Проверяем диаметр провода по допустимой плотности тока:

$$d_1 \geqslant 25\cdot 10^{-3}\cdot \sqrt{I_0} = 25\cdot 10^{-3}\sqrt{70} = 0{,}21 \text{ мм}.$$

Исходя из допустимой плотности тока, мы получили большее значение диаметра провода. Поэтому во избежание перегрева трансформатора при работе выбираем для первичной обмотки провод ПЭ 0,21.

10. Диаметр провода вторичной обмотки

$$d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}11}{\sqrt{\frac{1}{40}}} = 0{,}72 \text{ мм};$$

здесь в качестве d_1 подставляем величину, найденную по допустимому сопротивлению обмоток, так как через вторичную обмотку постоянный ток не проходит и ее перегрева опасаться не следует.

11. В заключение сделаем проверку размещения обмоток в окне сердечника. Для двухтактного трансформатора целесообразно осуществить намотку на каркасе, разделенном на две секции (фиг. 13). Это с одной стороны, уменьшит опасность пробоя между витками первичной обмотки и, с другой стороны, позволит выполнить половины первичной обмотки трансформатора более симметричными.

При такой конструкции в каждой секции наматывается половина витков первичной и вторичной обмоток. Проверим заполнение секции.

Первичная обмотка:

Число витков в слое секции $\frac{20}{d_{1\,из}} = \frac{20}{0{,}24} = 83.$

Число витков в секции $\frac{\frac{1}{2}w_1}{83} = \frac{1\,290}{83} = 16.$

Высота обмотки без прокладок $16\cdot 0{,}24 = 3{,}8$ *мм*.
Толщина прокладок между слоями ~ 2 *мм*.
Полная высота первичной обмотки $3{,}8 + 2 \approx 6$ *мм*.

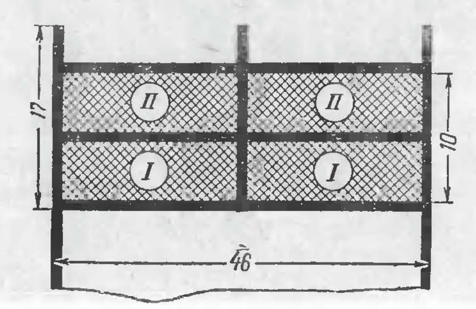
Вторичная обмотка:

Число витков в слое секции $\frac{20}{d_{2\,из}} = \frac{20}{0{,}8} = 25.$

Число слоев в секции $\frac{\frac{1}{2} w_2}{25} = \frac{33}{25} \approx 2.$

Высота вторичной обмотки $0{,}8 \cdot 2 \approx 2$ *мм.*
Толщина прокладки между обмотками 2 *мм.*
Полная высота заполнения секции $6 + 2 + 2 = 10$ *мм.*

На фиг. 13 приведен эскиз размещения обмоток в окне сердечника, из которого видно, что заполнение окна получается вполне допустимым. Следует иметь в виду, что проделанный расчет заполнения окна как в данном примере, так и в предыдущем справедлив лишь при намотке трансформатора виток к витку (вслой). При намотке вразброс обмотки займут значительно больше места и могут не поместиться на каркасе. Трансформаторы целесообразно наматывать вслой, что повышает их электрическую прочность и заметно уменьшает геометрические размеры.



Фиг. 13. Эскиз размещения обмоток выходного трансформатора.

Рассчитанный выше трансформатор, при работе в двухтактном каскаде на лампах 6П3С по схеме с отрицательной обратной связью, может обеспечить приблизительно следующие качественные показатели:

частотные искажения в полосе от 100 *гц* порядка 1,5 *дб*;
частотные искажения в полосе от 50 *гц* порядка 3,0 *дб*;
к. п. д. (на средних звуковых частотах) составляет 85—90%.

Читатели, желающие более подробно ознакомиться с теорией и расчетом усилителей и трансформаторов низкой частоты, могут это сделать по следующим книгам:

1. Г. В. Войшвилло, Усилители низкой частоты, Связьиздат, 1939.
2. С. Н. Кризе, Усилители низкой частоты, Связьиздат, 1948.
3. Г. С. Цыкин, Трансформаторы низкой частоты, Связьиздат, 1950.
4. А. А. Ризкин, Основы теории усилительных схем, Советское радио, 1951.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТАБЛИЦА СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ ПО ОБМОТОЧНЫМ ПРОВОДАМ

Провод без изоляции				Провод в изоляции											
				ПЭ и ПЭЛ		ПЭШО		ПШО		ПШД		ПБО		ПЭБО	
Диаметр провода, *мм*	Площадь поперечного сечения, *мм²*	Сопротивление 1 000 *м* при 20°С, *ом*	Вес 1 000 *м*, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1 000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1 000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1 000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1 000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1 000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1 000 *м* с изоляцией, *кг*
0,05	0,00196	8 920	0,0175	0,06	0,018	0,110	0,026	0,10	0,024	0,15	0,033	—	—	—	—
0,06	0,00283	6 180	0,0252	0,07	0,026	0,120	0,034	0,11	0,032	0,16	0,041	—	—	—	—
0,07	0,00385	4 540	0,0343	0,08	0,035	0,130	0,045	0,12	0,042	0,17	0,052	—	—	—	—
0,08	0,00502	3 480	0,0448	0,09	0,046	0,140	0,057	0,13	0,054	0,18	0,065	—	—	—	—
0,09	0,00636	2 750	0,0567	0,10	0,058	0,150	0,070	0,14	0,067	0,19	0,078	—	—	—	—
0,10	0,00785	2 230	0,070	0,115	0,073	0,165	0,089	0,15	0,083	0,20	0,103	—	—	—	—
0,11	0,00950	1 840	0,085	0,125	0,088	0,175	0,105	0,16	0,100	0,21	0,120	—	—	—	—
0,12	0,01131	1 546	0,101	0,135	0,104	0,185	0,132	0,17	0,117	0,22	0,138	0,21	0,127	0,225	0,134
0,13	0,01327	1 317	0,118	0,145	0,121	0,195	0,141	0,18	0,135	0,23	0,157	0,22	0,146	0,235	0,153
0,14	0,01539	1 136	0,137	0,155	0,140	0,205	0,161	0,19	0,155	0,24	0,178	0,23	0,167	0,245	0,173
0,15	0,01767	989	0,158	0,165	0,161	0,215	0,184	0,20	0,177	0,25	0,201	0,24	0,188	0,255	0,198
0,16	0,02011	869	0,179	0,175	0,183	0,225	0,206	0,21	0,199	0,26	0,224	0,25	0,211	0,265	0,220
0,17	0,02270	770	0,202	0,186	0,206	0,235	0,230	0,22	0,223	0,27	0,249	0,26	0,235	0,275	0,244
0,18	0,02545	687	0,227	0,195	0,231	0,245	0,256	0,23	0,249	0,28	0,276	0,27	0,262	0,285	0,271
0,19	0,02835	617	0,253	0,205	0,258	0,255	0,284	0,24	0,276	0,29	0,304	0,28	0,289	0,295	0,299
0,20	0,03142	556	0,280	0,215	0,285	0,280	0,312	0,26	0,304	0,32	0,333	0,29	0,318	0,310	0,328
0,21	0,03464	505	0,309	0,23	0,316	0,290	0,346	0,27	0,334	0,33	0,364	0,30	0,349	0,320	0,361
0,23	0,04155	421	0,370	0,25	0,378	0,310	0,410	0,29	0,397	0,35	0,429	0,32	0,413	0,340	0,427
0,25	0,04909	356	0,437	0,27	0,445	0,330	0,480	0,31	0,466	0,37	0,501	0,34	0,483	0,360	0,498
0,27	0,05726	305	0,510	0,295	0,521	0,355	0,560	0,33	0,541	0,39	0,578	0,38	0,572	0,405	0,593
0,29	0,06605	265	0,589	0,315	0,601	0,375	0,641	0,35	0,622	0,41	0,661	0,40	0,654	0,425	0,676
0,31	0,07548	232	0,673	0,34	0,688	0,400	0,733	0,37	0,709	0,43	0,749	0,42	0,743	0,450	0,769

Провод без изоляции				Провод в изоляции											
				ПЭ и ПЭЛ		ПЭШО		ПШО		ПШД		ПБО		ПЭБО	
Диаметр провода, *мм*	Площадь поперечного сечения, *мм*^{2}	Сопротивление 1 000 *м* при 20°С, *ом*	Вес 1 000 *м*, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *кг*	Вес 1000 *м* с изоляцией, *кг*	Диаметр с изоляцией, *мм*	Вес 1000 *м* с изоляцией, *кг*
0,33	0,08553	204	0,762	0,36	0,778	0,420	0,826	0,39	0,800	0,45	0,842	0,44	0,836	0,470	0,863
0,35	0,09621	182	0,857	0,38	0,874	0,440	0,924	0,41	0,897	0,47	0,942	0,46	0,934	0,490	0,963
0,38	0,11341	154	1,01	0,41	1,03	0,470	1,084	0,44	1,054	0,50	1,102	0,49	1,094	0,520	1,126
0,41	0,13202	132	1,18	0,44	1,20	0,505	1,262	0,47	1,223	0,53	1,274	0,52	1,266	0,555	1,307
0,44	0,15205	115	1,36	0,475	1,38	0,535	1,445	0,50	1,404	0,56	1,458	0,55	1,450	0,585	1,493
0,47	0,17349	100	1,55	0,505	1,57	0,565	1,640	0,53	1,598	0,59	1,655	0,58	1,646	0,615	1,691
0,49	0,18848	92,7	1,68	0,525	1,71	0,585	1,780	0,55	1,735	0,61	1,795	0,60	1,785	0,635	1,826
0,51	0,20428	85,6	1,82	0,545	1,85	0,610	1,929	0,57	1,877	0,63	1,939	0,62	1,929	0,66	1,983
0,55	0,23758	73,6	2,12	0,59	2,15	0,650	2,228	0,61	2,178	0,67	2,245	0,66	2,234	0,70	2,292
0,59	0,27340	63,9	2,44	0,63	2,47	0,690	2,561	0,65	2,502	0,71	2,572	0,70	2,560	0,74	2,623
0,64	0,32170	54,3	2,88	0,68	2,91	0,740	3,012	0,70	2,947	0,76	3,023	0,75	3,010	0,79	3,078
0,69	0,37393	46,7	3,33	0,73	3,42	0,790	3,528	0,75	3,458	0,81	3,539	0,80	3,475	0,84	3,549
0,74	0,43008	40,64	3,83	0,79	3,89	0,850	4,006	—	—	—	—	0,85	3,985	0,90	4,082
0,80	0,50265	34,77	4,48	0,85	4,49	0,910	4,618	—	—	—	—	0,91	4,593	0,96	4,698
0,86	0,58088	30,09	5,18	0,91	5,24	0,970	5,379	—	—	—	—	0,97	5,855	1,02	5,465
0,93	0,67929	25,73	6,05	0,98	6,12	1,040	6,273	—	—	—	—	1,04	6,256	1,09	6,365
1,00	0,78540	22,25	7,00	1,05	7,07	1,120	7,236	—	—	—	—	1,125	7,227	1,18	7,335
1,08	0,9161	19,08	8,16	1,14	8,26	1,200	8,435	—	—	—	—	1,205	8,412	1,26	8,575
1,16	1,0568	16,54	9,41	1,22	9,22	1,280	9,709	—	—	—	—	1,285	9,676	1,34	9,850
1,20	1,1310	15,48	10,10	1,26	10,22	1,320	10,308	—	—	—	—	1,325	10,35	1,38	10,53
1,25	1,2272	14,25	10,94	1,31	11,05	1,370	11,250	—	—	—	—	1,375	11,22	1,43	11,41
1,35	1,4314	12,20	12,76	1,41	12,88	1,470	13,090	—	—	—	—	1,475	13,06	1,53	13,26
1,45	1,6513	10,58	14,72	1,51	14,86	1,570	15,080	—	—	—	—	1,575	15,04	1,63	15,26
1,56	1,9113	9,15	17,04	1,62	17,18	—	—	—	—	—	—	1,685	17,38	1,74	17,62

Цена 80 коп.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

под общей редакцией академика А. И. БЕРГА

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ И ПОСТУПИЛИ В ПРОДАЖУ

БАУМГАРТС В. Ф., Сельская радиопередвижка, стр. 40, ц. 1 р. N 137

ГАНЗБУРГ М. Д., Трехламповый супергетеродин, стр. 32, ц. 80 к. N 145

ДОЛЬНИК А. Г., Выпрямители с умножением напряжения, стр. 32, ц. 80 к.

ЕВДОКИМОВ П. И., Методы и системы многоканальной радиосвязи, стр. 64, ц. 1 р. 50 к.

КОМАРОВ А. В. и ЛЕВИТИН Е. А., Радиовещательные приемники „Москвич" и „Кама", стр. 12, ц. 90 к.

ЛЕВАНДОВСКИЙ Б. А., Шкалы и верньерные устройства, стр. 64, ц. 1 р. 50 к. N 136

ЛЕВИТИН Е. А., Новое в изготовлении радиоаппаратуры, стр. 72, ц. 1 р. 70 к.

ТУТОРСКИЙ О. Г., Простейшие любительские передатчики и приемники УКВ, стр. 56, ц. 1 р. 25 к. N 135

ПРОЗОРОВСКИЙ Ю. Н., Любительские коротковолновые радиостанции, стр. 56, ц. 1 р. 40 к. N 13

РАХТЕЕНКО А. М., Карманные радиоприемники, стр. 16, ц. 40 к. N 140

ШУМИХИН Ю. А., Введение в импульсную технику, стр. 112, ц. 2 р. 70 к.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ КНИЖНЫХ МАГАЗИНАХ И КИОСКАХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЗАКАЗОВ НЕ ВЫПОЛНЯЕТ